Source X quasi ponctuelle par X-pinch en régime sub- μ s

L.E. Aranchuk et J. Larour

*Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas (LPTP), UMR 7648 CNRS,
École Polytechnique, 91128 Palaiseau, France*

Résumé. Les plasmas de *X-pinch* sont connus pour constituer des sources X quasi-ponctuelles applicables au sondage radiographique éclair. Ils sont couramment alimentés par des grands générateurs électriques pulsés délivrant une impulsion de haute tension à temps de montée rapide, typiquement moins de 100 ns. Un générateur LC (40kV, 200kA) très compact a été utilisé pour alimenter des *X-pinches* à fils de Cu, Mo et de W avec un temps de montée du courant de 200 ns. On enregistre un pic d'émission X avec un faible *jitter* temporel. Une imagerie de pénombre intégrée en temps donne une dimension de source inférieure à 15 μ m dans la région au-dessus de 2,4 keV. Une émission totale supérieure à 80 mJ et une durée d'émission de 1,5 ns sont obtenues. On peut observer une source X unique mais aussi une structure de source double ou supérieure. Des mesures spectrales récentes sont présentées pour des fils de Cu et de Mo : raies de CuXX et CuXXI (850–1100 eV) et raies du Mo XXXIII (2,4–2,7 keV).

1. INTRODUCTION

Un plasma de *X-pinch* est obtenu au croisement de deux fils fins ou plus, se touchant en un point, formant une structure en X et la charge d'un générateur de puissance pulsée. Le courant est partagé entre les fils sauf au croisement où toute l'intensité est disponible pour imploser le plasma formé par l'explosion initiale des fils et donner une source X unique de la taille du micron. Par radiographie de projection, cette source peut donner une image à résolution temporelle et spatiale de plasmas denses. Cette technique a permis de sonder des plasmas de *Z-pinches* sur de grands générateurs [1]. D'autres applications sont possibles en biosciences ou en nano-technologies. Les *X-pinches* sont principalement étudiés en Angleterre [2] et à Cornell aux USA [3, 4].

2. EXPÉRIMENTATION

L'expérimentation a été conduite sur un générateur LC compact appelé PIAF et présenté sur la figure 1. Le circuit électrique équivalent comporte un condensateur, une inductance, un commutateur et une charge, inductive et/ou résistive connectés en série. La très faible inductance totale de l'ensemble permet de délivrer un courant très élevé pour une énergie stockée modeste avec un temps de montée du courant sub-microseconde. Le générateur a été décrit en détails [5]. Brièvement, il est formé de 6 condensateurs NWL 180nF $\times$ 50kV en parallèle, commutés par un éclateur multi-étages multi-canaux pour délivrer un courant pulsé dans une chambre via une ligne à vide peu inductive. Le commutateur fonctionne dans l'air ambiant, c'est à dire sans surpression ni flux de gaz. Le retard entre l'impulsion de déclenchement et le claquage de l'éclateur est de 80 ns avec un *jitter* de 6 ns seulement. La masse de l'ensemble est inférieure à 100 kg pour un volume 66 $\times$ 66 $\times$ 66,5 cm³.

En court-circuit sur une inductance de 6 nH, l'intensité du courant atteint 250 kA avec un temps de montée $\tau_I(0.1-0.9) = 174$ ns pour une tension de charge de 40 kV.

Sur l'installation PIAF [5], les fils croisés sont placés entre anode et cathode, séparées de $d_{A-C} = 9$ mm.

Une caméra multi-sténopés avec des filtres variés résout spatialement l'émission X du plasma. Une résolution accrue a été obtenue par imagerie de pénombre. Un trou calibré Ø 200 μ m, placé à 21 cm de la source et filtré par 8 μ m de titane ($h\nu > 2,36$ keV), est projeté sur un film à 256 cm de la source.

Ceci donne un grandissement de 12 et une densité optique $D < 2$. Les images sont enregistrées sur un film Kodak DEF [6]. Des diodes photoélectriques X (DPX) filtrées à cathode Al sont les détecteurs primaires de flux X, de sensibilité (228-276 eV, $h\nu > 827$ eV) et $h\nu > 1060$ eV respectivement.

Le spectre de rayonnement a été analysé autour de 1 keV et de 2,6 keV par deux spectrographes X, avec intégration temporelle et sans résolution spatiale compte-tenu de la petitesse de la source. Une gamme spectrale large est enregistrée avec un cristal de mica convexe ($2d = 19.84$ Å). Pour un rayon de courbure de 11,5 mm et une distance de 22 cm entre la source et l'axe du cristal, la dispersion sur un film cylindrique ($R = 28$ mm) est 25 eV/mm à 1 keV. Une région plus étroite est analysée avec un spectrographe à cristal plan : KAP ($2d = 26,64$ Å) et PET ($2d = 8,74$ Å) pour les tirs de Cu et de Mo respectivement. La distance étant de 38 cm entre source et cristal et de 4 cm entre cristal et film, la dispersion est 4 eV/mm à 1 keV. La fente d'entrée (4 mm $\times$ 20 mm) est couverte par un filtre de 15 μ m de Be et la moitié de sa surface est en outre couverte d'un filtre de 3 μ m d'Al pour identifier les ordres élevés. Les spectres, intégrés dans le temps, sont enregistrés sur film DEF et traités comme les images de sténopé. Pour chaque tir, la position absolue des raies est d'abord estimée à partir de la géométrie, puis un jeu de raies sélectionnées est identifié par comparaison aux bases de données et aux raies observées dans les plasmas chauds de *X-pinch* et de *Z-pinch*.

Figure 1. Schéma et vue générale du générateur PIAF.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Des résultats préliminaires sur les expériences *X-pinch* ont été présentés [5]. L'instant du pic d'émission, pour 80% des tirs avec 2 fils de 25 μ m de Mo, se situe entre 182 et 190 ns après le démarrage du courant, à un niveau entre 130 et 140 kA alors que le pic de courant est bien supérieur (200-210 kA). La largeur du pic de rayonnement (pleine largeur à mi-hauteur) descend à 1,5 ns pour la DPX couverte de 16 μ m de polypropylène (XRD2) et 3 à 4 ns pour XRD1, filtrée par 8 μ m de polypropylène. Le retard entre le démarrage du courant et le pic X va de 143 à 149 ns pour deux fils de Cu de 25 μ m et vaut ~ 165 ns pour deux fils de W de 18 μ m.

Sur les images sténopé intégrées en temps pour un *X-pinch* à deux fils [5], un jet de plasma est observé dans les régions de champ magnétique minimal, le long de l'axe du *X-pinch*. Cependant, l'essentiel du rayonnement provient de la région du croisement, légèrement décalée vers l'anode. La structure des sources est étudiée par des sténopés de 10 μ m (la résolution spatiale, incluant le traitement d'image,

étant de $\sim 20 \mu\text{m}$) avec différents filtres. Sur les images à haute résolution spatiale, avec un filtre de $5 \mu\text{m}$ d'Al et $15 \mu\text{m}$ de Be, on observe des structures à un ou deux coeurs. Il arrive que 3 ou 4 sources d'intensités différentes soient observées. Le tungstène conduit très souvent à une source X unique de taille $\sim 100 \mu\text{m}$ entourée d'un halo diffus. Une structure à deux points est généralement observée pour deux fils de $25 \mu\text{m}$ de Mo. Chacune de ces sources a un diamètre de $\sim 60 \mu\text{m}$ avec un écartement de $\sim 90 \mu\text{m}$, et se trouve sur une ligne légèrement inclinée sur l'axe vertical anode - cathode. Il est cependant possible d'obtenir aussi une source ponctuelle unique pour le Mo. Les DPX, mesurant le rayonnement au dessus de $h\nu > 700 \text{ eV}$, donnent des impulsions de 1,5-1,75 ns dans les deux cas.

Figure 2. *X-pinch* à 2 fils W 18 μm : (a) images intégrées en temps à sténopés $\varnothing 10 \mu\text{m}$ (#1) filtre 4 μm Ti, (#2) filtre 2 μm Fe, (#3) filtre 15 μm Be. (b) signal DPX, filtre 16 μm PP, (c) image de pénombre d'un trou $\varnothing 200 \mu\text{m}$, filtre 8 μm Ti. (d) image trou + grille $63 \times 13 \mu\text{m}$. Toutes les distances sont calculées dans le plan-source.

Les images intégrées par sténopé de $10 \mu\text{m}$ et l'image de projection en pénombre d'un trou de diamètre $200 \mu\text{m}$, pour deux fils de $18 \mu\text{m}$ de W, sont présentées figures 2.a et 2.c avec le signal de diode X (figure 2.b). Selon la gamme spectrale, la taille de source Δ_{source} , définie comme la largeur à mi-hauteur du densitogramme est $50 \times 85 \mu\text{m}^2$ pour $h\nu > 1,14 \text{ keV}$ et $30 \times 35 \mu\text{m}^2$ pour $h\nu > 2,1 \text{ keV}$. Ces valeurs sont proches de la résolution des sténopés. Le profil de pénombre de la projection d'un trou de $200 \mu\text{m}$ (filtre de $8 \mu\text{m}$ de Ti: $h\nu > 2,4 \text{ keV}$) donne $\Delta_{\text{pen}} = 12\text{-}14 \mu\text{m}$ avec une précision de $2 \mu\text{m}$. Cette valeur varie d'un tir à l'autre et selon la direction du profil. L'impulsion X associée dure moins de 2 ns.

Pour démontrer la possibilité d'une imagerie de projection (*backlighting*), une grille fine (barres de $13 \mu\text{m}$ de cuivre, pas de $63 \mu\text{m}$) a été installée sur le trou de $200 \mu\text{m}$. Filtrée par $8 \mu\text{m}$ de Ti, l'image de cette grille est présentée figure 2.d. Une simulation de l'image en projection a été réalisée avec une source à profil d'intensité gaussien. La comparaison des modulations calculées et observées permet une détermination supplémentaire de la taille de la source Δ_{source} . Cette méthode donne $7,5 \pm 2 \mu\text{m}$, valeur proche de la limite de diffraction du fil grille de $13 \mu\text{m}$ pour des photons de $2,4\text{-}5 \text{ keV}$.

Enfin, nous avons tenté avec succès de retrouver les raies spectrales mises en évidence sur d'autres expériences *Z-pinch* et *X-pinch* [3, 4, 7, 8]. Les premiers résultats sont présentés figure 3. Les raies du

Cu XX (néonoïde) et du Cu XXI (fluoroïde) dans la région 850–1100 eV sont identifiées pour deux fils de 25 μm de Cu. De même, les raies du molybdène ionisé 32 fois (néonoïde) sont observées dans la gamme 2,4–2,7 keV pour deux fils de 25 μm de Mo. Une étape suivante consistera à analyser les spectres en terme de densité électronique et de température en utilisant des modèles dynamiques d'ionisation du plasma. Enfin, les images de pénombre permettent d'estimer la production de rayonnement X par un *X-pinch* supposé émettre de façon isotrope dans 4π . Le nombre total N de photons rayonnés par la source est $N = f \times 4\pi L^2 / \chi$, où f est le niveau d'exposition, L la distance source-film et χ la transmission du filtre. D'une estimation grossière du spectre confortée par les images filtrées de sténopé, on tire que, dans la gamme 2,5–5 keV, une source ponctuelle créée par notre plasma de *X-pinch* émet environ 50 mJ en moyenne, parfois 80 à 100 mJ, pendant 1,5 à 2 ns.

Figure 3. Densité optique des films spectrographiques pour un *X-pinch* à deux fils de cuivre 25 μm . Les spectres du Cuivre sont rappelés pour identification.

Remerciements

Ce travail est soutenu par la DGA, contrat. CEG 01-25-091-00-470-46-51. Jean-Michel André (LCMR, UMR 7641) est remercié pour son aide précieuse lors du démarrage de la spectroscopie à cristal.

Bibliographie

- [1] S.V. Lebedev, F.N. Beg, S.N. Bland et al., *Phys. Rev. Lett.*, **85** (2000) 98-101.
- [2] F.N. Beg, K. Krushelnick, P. Lichsteiner et al., *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 4602-4604.
- [3] T.A. Shelkovenko, D.B. Sinars, S.A. Pikuz et al., *Phys. Plasmas*, **8** (2001) 1305-1318.
- [4] T.A. Shelkovenko, S.A. Pikuz, D.B. Sinars et al., *Phys. Plasmas*, **9** (2002) 2165-2172.
- [5] L.E. Aranchuk, A.S. Chuvatin and J. Larour, *Rev. Sci. Instrum.*, **75** (2004) 69-75.
- [6] B.L. Henke, J.Y. Uejio, G.F. Stone et al., *J. Opt. Soc. Am. B*, **3** (1986) 1540-1550.
- [7] A.R. Mingaleev, J. Nilsen, S.A. Pikuz et al., *Kvantovaya Elektronika*, **20** (1993) 461-470.
- [8] A.S. Shlyapseva, S.B. Hansen, V.L. Kantsyrev et al., *Phys. Rev. E*, **67** (2003) 026409.